

智能塑壳断路器的过载保护与通信集成技术研究

王金珏

三为电气股份有限公司 浙江温州 325000

【摘要】塑壳断路器是低压配电系统的核心保护电器，其智能化升级对保障供电安全至关重要。智能塑壳断路器融合传统热磁保护与数字通信技术，从被动保护装置转型为具备主动感知与交互能力的智能终端。本文聚焦过载保护演进与通信集成机制，阐述保护物理本质、数字算法自适应特性及多层通信架构设计。研究指出，过载保护智能化旨在建立电流-时间-温度多维映射模型，实现精准可调与环境自适应；通信集成则构建承载保护逻辑与控制指令的双向可信通道。本文构建电气保护与信息通信融合的理论框架，为智能塑壳断路器的标准化设计与应用提供指引。

【关键词】智能塑壳断路器；过载保护；热磁脱扣；数字保护；通信集成；IEC 61850；信息安全

Research on Overload Protection and Communication Integration Technology for Intelligent Enclosed Circuit Breakers

Wang Jinjue

Sanwei Electric Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】 Enclosed circuit breakers serve as the core protective devices in low-voltage power distribution systems, and their intelligent upgrades are critical for ensuring power supply safety. By integrating traditional thermal/magnetic protection with digital communication technologies, these devices have evolved from passive protection units into intelligent terminals with active sensing and interaction capabilities. This paper focuses on the evolution of overload protection and its communication integration mechanisms, elucidating the physical principles of protection, the adaptive characteristics of digital algorithms, and the design of multi-layer communication architectures. The study demonstrates that intelligent overload protection aims to establish a multidimensional current-time-temperature mapping model for precise, adjustable, and environment-adaptive performance, while communication integration establishes a bidirectional trusted channel for transmitting protection logic and control commands. This research establishes a theoretical framework for integrating electrical protection with information and communication technologies, providing guidance for the standardized design and application of intelligent enclosed circuit breakers.

【Key words】 Intelligent molded case circuit breaker; Overload protection; Thermomagnetic trip; Digital protection; Communication integration; IEC 61850; Information security

引言

塑壳断路器是低压配电系统中实现线路过载与短路保护的关键设备，广泛应用于工业、商业及民用场景。传统断路器依赖双金属片热脱扣器，虽结构简单、可靠性高，但存在保护特性固定、受环境温度影响大且缺乏状态反馈等局限，难以满足“双碳”背景下对能效管理与数字电网的高阶需求。为此，集成高精度采样与数字处理单元的智能塑壳断路器应运而生。

智能塑壳断路器的核心在于过载保护数字化与通信集成能力的深度融合。二者并非独立模块，而是相互依存的有机整体：通信赋能保护，实现参数远程配置、事件上传及数据追溯；保护制约通信，要求其具备极高的实时性、确定性与安全性，以防通信异常导致保护失效。因此，研究必须超越单一技术视角，从系统论高度剖析保护原理与通信技术的内在逻辑与协同机理。本文旨在通过严谨推演，深入探讨其理论基础、实现路径与集成约束，为智能塑壳断路器的技术发展、标准化设计及系统化应用提供坚实的理论支撑。

一、过载保护的物理本质与性能边界

过载保护旨在防止导体因长期过流引发绝缘老化、熔毁或火灾，其物理本质是动态热力学过程，电流产热使导体升温，达临界值触发脱扣切断电路。传统热脱扣器用双金属片模拟，动作特性由材料和结构决定，呈固定反时限曲线，但该曲线仅代表标准环境理想热平衡状态，实际应用中性能边界受多重制约。

1.1 热力学机理与固定反时限特性的局限

传统保护靠“热模拟”，即双金属片形变复现导体温升，虽直观可靠，但动作曲线固定，无法区分不同绝缘等级导体耐热差异和适应多样负载需求，在复杂配电场景中难寻“防止误动”与“确保拒动”平衡点，保护精度受限。

1.2 环境热耦合与安装散热条件的动态干扰

实际运行中，保护性能易受外部热环境干扰。环境温度直接影响，高温使双金属片动作时间缩短，引发误跳闸，低温则可能导致保护迟钝或拒动；安装方式也有制约，配电柜内密集安装时，断路器间热耦合效应显著，散热效率下降，

局部温升加剧,使保护特性曲线偏移,提前动作,影响供电连续性。

1.3 非线性负载特征与谐波热效应的识别盲区

电力电子设备普及使负载特性复杂,传统热脱扣器在波形识别上有盲区。非线性负载产生的谐波电流热效应大,但双金属片只响应有效值,无法区分基波与谐波,不能感知波形畸变额外温升风险,面对含高次谐波工况无法准确评估绝缘热损伤,留下安全隐患。因此,过载保护性能边界受多因素动态耦合影响,是智能化升级需突破的关键痛点。

二、数字式过载保护的算法逻辑与自适应特性

数字式过载保护依托高精度电流采样与微处理器运算,实现了对导体热力学过程的精确建模与动态调控。其核心算法基于“热积累”原理构建数字积分模型:将电流有效值的平方(I^2)视为单位时间发热量,通过时间积分计算虚拟“热积累值”。当该值触及预设阈值,即判定过载并触发脱扣。这一模型本质上是对导体热惯性的数学抽象,能够比机械结构更真实地还原不同电流波形下的实际温升轨迹,为智能化保护奠定了算法基石。

2.1 基于热积分模型的精准映射与可编程特性

数字保护的首要优势在于其卓越的可编程性,彻底打破了传统固定曲线的束缚。系统允许用户依据被保护线路的实际载流量、电缆绝缘类型、敷设方式等具体工况,通过通信接口灵活设定长延时脱扣电流倍数(I_r)和脱扣时间(t_r)。这种机制使得保护装置能够生成一条完全匹配特定应用场景的个性化反时限曲线,实现了从“通用型保护”向“定制化防护”的跨越。无论是敏感电子设备还是重载电机,均可获得最适宜的保护特性,显著提升了配电系统的兼容性与安全性。

2.2 环境感知的动态补偿与全工况自适应

针对环境温度对保护精度的影响,数字保护引入了实时环境自适应机制。通过集成高精度温度传感器,系统能够持续监测断路器本体或柜内环境温度,并据此动态修正热积累模型的关键参数。在高温环境下,算法自动调整脱扣阈值或加速热积累速率,以抵消环境热应力导致的误动风险;而在低温环境中,则适当放宽阈值以维持灵敏度。这种闭环反馈调节能力,确保了保护特性在 -25°C 至 $+70^{\circ}\text{C}$ 的宽温域范围内保持高度一致,消除了传统双金属片因温度漂移产生的动作误差。

2.3 谐波频谱分析与等效热效应加权修正

面对日益复杂的非线性负载,数字保护具备强大的谐波热效应补偿能力。利用快速傅里叶变换(FFT)等先进算法,系统可实时分离电流中的基波与各次谐波分量,并严格遵循国际标准(如IEC 60947-2),对各次谐波施加特定的加权系数进行K因子计算。通过加权求和得出的等效发热功率,能够准确反映高频谐波引发的集肤效应与额外温升。这一机制有效填补了传统保护对波形畸变识别的盲区,防止了因谐波过热导致的绝缘提前老化,真正实现了基于真实热损伤的精准防护。

三、通信协议在保护功能中的角色定位

在智能塑壳断路器架构中,通信协议绝非简单的附加模块,而是智能化特征得以落地的核心载体。它在保护功能体系中扮演着三重关键角色:双向信息通道、分布式逻辑延伸以及内生安全屏障。这三者共同构建了物理保护与数字世界深度融合的基石。

3.1 双向透明化的实时信息交互通道

作为信息通道,通信协议打破了传统断路器的“黑箱”状态,建立了设备本体与上层管理系统间的数据纽带。一方面,它负责将采样单元获取的实时电流、电压、功率因数及电能数据,连同脱扣事件、故障波形记录等状态信息,以标准化格式高频上传;另一方面,它承载来自上位机的参数整定、远程复位及固件升级指令。这种全双工的信息流动,实现了运维模式从“被动抢修”向“主动预测性维护”的根本转变,为精细化能源管理提供了详实的数据支撑。

3.2 广域协同的保护逻辑动态延伸

通信协议将保护决策的边界从单点设备拓展至整个配电网,实现了保护逻辑的分布式协同。通过协议交互,上级能源管理系统可依据电网拓扑与实时负荷,向多台断路器下发动态整定指令。例如,在发生故障时,系统可临时调整下游断路器的延时特性或脱扣阈值,实现毫秒级的选择性配合,确保仅故障点最近端设备动作。这种基于通信的“区域保护”策略,有效解决了传统级联保护中难以兼顾灵敏度与选择性的矛盾,最大限度地缩小了停电范围,提升了供电可靠性。

3.3 内嵌于传输链路的功能安全屏障

鉴于通信对保护功能的深度介入,协议本身必须构建严密的安全防御体系。这包括实施严格的身份认证与权限分级机制,杜绝非法远程脱扣或参数篡改;采用加密算法与完整性校验技术,确保指令与数据在传输过程中不被窃取或伪造。更为关键的是,协议需具备链路状态自诊断与故障失效保护(Fail-Safe)机制:一旦检测到通信中断或异常,断路器应立即自动切换至本地预设的独立保护策略,确保在任何通信工况下,底层的过载与短路保护功能始终在线且可靠,真正实现“通信可断,保护不失”。

四、多层通信架构的设计原则与协议选型

为适配不同场景对实时性、可靠性及开放性的差异化需求,智能塑壳断路器通信架构宜采用分层设计,划分为现场级、控制级与管理级。各层级需遵循“向下兼容、向上开放、横向互联”原则,依据通信距离、速率及业务特性匹配最优协议,构建高效协同的通信体系。

4.1 现场级:高实时性与确定性的本地协同

现场级位于架构底层,直连断路器本体,核心诉求在于毫秒级的响应速度与极强的抗干扰能力,主要服务于保护功能的本地快速联动。在此层级,CAN总线凭借非破坏性仲裁机制、高容错性及成熟的工业基础成为首选。其确定性的低时延特性,确保了在短路等紧急故障下,柜内多台断路器

间的状态同步与连锁指令能无误传递,为选择性保护提供坚实的物理层保障。

4.2 控制级: 高效吞吐与集中监控的桥梁

控制级连接断路器与本地 PLC、RTU 或智能网关,侧重平衡实时性与数据吞吐量,旨在实现设备的集中监视与批量参数配置。Modbus TCP 协议因其帧结构简洁、生态兼容性强及基于以太网的部署便利性,成为该层主流标准。它高效支撑遥测、遥信、遥控、遥调“四遥”功能,是构建区域配电自动化系统、实现本地数据汇聚与指令下发的关键枢纽。

4.3 管理级: 标准化语义与云端互操作生态

管理级面向企业级能效平台或云端系统,核心在于开放性、标准化语义及数据安全。面对海量异构设备数据,必须采用 IEC 61850 等行业标准协议。该标准通过统一的数据模型与服务接口,将断路器抽象为 MMXU (测量)、GGIO (通用输入输出) 等标准化逻辑节点,彻底打破厂商壁垒,实现跨品牌设备的无缝互操作。这种分层协议体系,既满足了底层保护的严苛实时约束,又融入了上层信息系统的开放生态,实现了灵活性与可靠性的完美统一。

五、保护与通信的协同工作与安全约束

智能塑壳断路器的核心价值,在于过载保护功能与通信能力在复杂工况下的深度协同与可靠耦合。这种协同绝非功能的简单叠加,而是在严格的逻辑优先级、时间确定性边界及信息安全防线内进行的精密配合,确保智能化升级不以牺牲基础安全为代价。

5.1 本地硬件保护的绝对优先权机制

系统设计的基石是确立“本地硬件保护至高无上”的优先级原则。无论通信链路状态如何(中断、拥塞或延迟),也无论上位机是否下发指令,一旦检测到电流超过预设的硬脱扣阈值(通常由独立的模拟电路或不可通过通信修改的固件门限控制),断路器必须立即执行物理脱扣。通信功能仅被定位为保护策略的优化器与丰富者,严禁其介入或干预核心的瞬时切断逻辑。这一刚性约束确保了在最极端的网络故障场景下,设备仍能坚守防止火灾与设备损毁的最后防线。

5.2 基于时延建模的动作时间确定性约束

针对涉及保护动作的通信指令(如远程分闸或动态定值调整),系统必须实施严格的时间窗口管理。端到端的通信

延迟需经过精确建模,综合考量协议栈处理时间、网络拓扑跳数及设备机械动作时间。若计算出的最坏情况延迟超出保护选择性要求的时限,该通信指令只能降级为后备保护或辅助手段,严禁作为主保护依赖。系统设计需在实时操作系统中预留充足的时间裕度,确保在任何网络负载下,关键保护指令均能满足速动性与选择性的严苛要求。

5.3 纵深防御体系下的信息安全屏障

通信接口的引入扩展了设备的攻击面,因此必须构建多层级的纵深防御体系。在边界侧,需部署工业防火墙与入侵检测机制,对所有入站指令进行身份认证、合法性校验及完整性签名验证;在数据层,对关键保护参数(如脱扣曲线、阈值)实施严格的写保护与访问控制列表(ACL)管理;在审计层,建立不可篡改的操作日志系统,全量记录通信事件、参数变更及异常行为,支持事后追溯与取证。唯有在满足上述刚性安全约束的前提下,通信集成方能成为提升断路器智能化水平的可靠助力,而非引入系统性风险的源头。

结论

本文通过对智能塑壳断路器的过载保护与通信集成技术进行系统性的理论探讨,揭示了二者之间深刻的内在联系与协同逻辑。研究表明,过载保护的智能化,本质上是通过建立一个能够精确模拟导体热惯性、并能动态响应环境与负载变化的数字模型,实现保护特性的精准、可调与自适应;而通信集成的智能化,则是通过构建一个分层、标准、安全的信息通道,将单台设备的保护能力延伸至整个配电网,并赋予其远程管理与协同决策的能力。二者成功融合的关键,在于坚守“保护功能优先、通信服务赋能”的根本原则,并在功能优先级、时间确定性与信息安全三个维度上设立不可逾越的刚性约束。

本研究虽未涉及具体的硬件电路设计或通信协议栈的代码实现,但通过严密的逻辑推演,构建了一个贯通电气保护原理与信息通信技术的完整理论框架。该框架不仅阐明了智能塑壳断路器“为何智能”与“如何智能”,更指明了其在工程实践中必须遵循的设计准则与安全底线。未来的研究可在此理论基础上,进一步探索人工智能算法在负荷预测与保护策略动态优化中的应用,并深化轻量化密码学在资源受限嵌入式设备上的安全通信实现,从而持续推动低压配电设备向更高水平的智能化、数字化与可信化方向发展。

参考文献

- [1]刘海滨,向小青,周明明. 塑壳断路器触头故障分析与优化设计[J]. 电器与能效管理技术,2025(7):44-48.
- [2]陈仲武. 智能型电子式低压塑壳断路器的设计[J]. 现代建筑电气,2024,15(5):15-20.
- [3]张振阳. 一种塑壳断路器电子脱扣器的设计[J]. 电器与能效管理技术,2024(7):54-59.
- [4]王康,曾静岚,郑宇,等. 基于场路耦合的电力变压器不同运行方式下漏磁场的仿真研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2021,26(4):28-37.
- [5]王祎凡,任春光,张佰富,等. 基于电压源型 PWM 整流电路的输电线路测量与感应取电一体化互感器实现方法[J]. 电工技术学报,2023,38(1):13-25.